

## Bemessungsmodell zur Berechnung der Tragfähigkeit von biegeverstärkten Stahlbetonplatten

Michael Frenzel<sup>1</sup>, Manfred Curbach<sup>2</sup>

**Zusammenfassung:** In diesem Beitrag werden ein Berechnungsverfahren und ein Bemessungskonzept für biegebeanspruchte textilbetonverstärkte Stahlbetonbauteile vorgestellt. Ihre Anwendbarkeit wird durch die Auswertung von Versuchen an verstärkten Stahlbetonplatten mit einer Reihe veränderlicher Ausgangswerte überprüft. Als Ergebnis dieser Arbeit stehen dem Anwender einfach nutzbare, praxisgerechte Bemessungstabellen zur Verfügung.

**Summary:** This article introduces a calculation method and a design concept for reinforced concrete elements strengthened with textile concrete. Its applicability is verified by an analysis of tests with strengthened steel reinforced concrete slabs with a certain variety of design parameters. Results of this work are easy manageable, praxis-orientated design tables that are available for users.

### 1 Einleitung

Experimentelle Untersuchungen in der Vergangenheit haben gezeigt, dass die Biegetragfähigkeit von Stahlbetonplatten durch das Aufbringen von textilen Verstärkungsschichten in der Zugzone signifikant erhöht werden kann. Die bisherigen Forschungen auf diesem Gebiet werden im Sachstandbericht der RILEM TC 201 [1], [2], in den Dissertationen und Veröffentlichungen von BÖSCHE [3], BÖSCHE ET AL. [4], [5] und WEILAND [6] wiedergegeben. Überschlägliche Berechnungen zum Abschätzen der Biegetragfähigkeit von verstärkten Bauteilen sind beispielsweise in SCHLADITZ ET AL. [7], JESSE & CURBACH [8], von Textilbetonbauteilen ohne Stahlbewehrung in HEGGER ET AL. [9] und HEGGER & VOSS [10] dokumentiert. Das von BÖSCHE [3] entwickelte Rechenverfahren basiert grundlegend auf dem Modell der Stahlbetonbemessung nach DIN 1045-1. Im Unterschied zu einer herkömmlichen Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit liegt bei Verstärkungsmaßnahmen eine Stahlbewehrung bereits vor und ist bei der Ermittlung der erforderlichen textilen Bewehrung zu berücksichtigen.

<sup>1</sup> Dipl.-Ing., Institut für Massivbau, TU Dresden

<sup>2</sup> Prof. Dr.-Ing., Institut für Massivbau, TU Dresden

Die Entwicklung neuer Beschichtungen und Textilien in den vergangenen Jahren, die damit verbesserten Materialeigenschaften und das Fehlen einer vereinfachten, aus einem (komplexen) Berechnungsverfahren hervorgegangenen, praxistauglichen Bemessungshilfe führten zu der Notwendigkeit, erneut textilbetonverstärkte Stahlbetonplatten zu prüfen, die Ergebnisse auszuwerten und weitere theoretische Betrachtungen zu tätigen.

## **2 Experimentelle Untersuchungen**

### **2.1 Allgemeines**

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 528 wurden sowohl von BÖSCHE [3] als auch von WEILAND [6] kleinformatige Stahlbetonplatten mit den Abmessungen 1,80 m x 0,60 m x 0,10 m mit Textilbeton verstärkt und auf Biegezugversagen im Vierpunktbiegeversuch untersucht. Die Wirksamkeit der textilen Verstärkung konnte an mehr als 50 Platten mit verschiedenen Glas- und Carbonfasergelegen nachgewiesen werden. Dabei wurden weder Plattengeometrie, noch Lage und Abmessungen der Stahlbewehrung verändert. Um die Anwendbarkeit des von BÖSCHE [3] aufgestellten Rechenverfahrens auf Platten mit unterschiedlicher Dicke, mit verschiedenen Bewehrungsgraden und Stahldurchmessern zu prüfen, wurden zehn Probekörper mit dem neu entwickelten Carbontextil NWM3-019-09-b1 verstärkt und analysiert. Für einen Vergleich erfolgte die zusätzliche Prüfung von fünf unverstärkten Referenzplatten.

### **2.2 Materialkennwerte**

#### **2.2.1 Beton**

Die Betonrezeptur der Stahlbetonplatten wurde nach DIN 1045-2 bzw. DIN EN 206-1 für die Festigkeitsklasse C 20/25 konzipiert. Die Stahlbetonplatten fertigte das Fertigteilwerk der Firma Quast Otto GmbH aus Coswig bei Dresden. Der Altbeton war zum Zeitpunkt der Prüfung ca. 320 Tage ausgehärtet. Die Bestimmung der Druckfestigkeit des Betons erfolgte an 14 Bohrkernen mit einem Durchmesser von 50 mm. Die ermittelten Festigkeiten wurden auf die üblicherweise verwendete Zylinderdruckfestigkeit nach DIN 12390-3 und DIN 1045-2 umgerechnet. Weiterhin erfolgte die Bestimmung des Elastizitätsmoduls an 13 Bohrkernen nach DIN 1048-5. Die Mittelwerte sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Für die Verstärkung kam der, im Rahmen des SFB 528 entwickelte, spezielle Feinbeton zum Einsatz. Seine Mischrezeptur (M2) ist beispielhaft in JESSE & CURBACH [8] zusammengestellt. Derzeit wird die fertige Mischung als Sackware von der Firma Pagel Spezialbeton GmbH & Co. KG hergestellt. Gemäß DIN EN 196 wurde an 17 Proben die Biegezugfestigkeit und an 34 Prüfprismen die Druckfestigkeit des Feinbetons bestimmt. Weiterhin erfolgte die Bestimmung des Elastizitätsmoduls und der Druckfestigkeit an 6 Normzylindern nach

DIN 1048-5. Die zentrische Zugfestigkeit des Feinbetons wird aus den experimentell ermittelten Spannungs-Dehnungs-Linien der Dehnkörper (siehe Bild 2) zu 3,5 N/mm<sup>2</sup> abgeschätzt. Die mittleren Kennwerte des eingesetzten Feinbetons zeigt Tabelle 1.

**Tabelle 1:** Kennwerte der verwendeten Betone (Mittelwerte)

**Table 1:** Properties of the applied concretes (mean values)

Altbeton	Zylinderdruckfestigkeit $f_c$	36,3	N/mm <sup>2</sup>
	Elastizitätsmodul $E_c$	29100	N/mm <sup>2</sup>
	Bruchdehnung <sup>3</sup> $\varepsilon_{cu}$	3,5	‰
Feinbeton <sup>4</sup>	Biegezugfestigkeit $f_{tc,ft}$	6,8	N/mm <sup>2</sup>
	Druckfestigkeit $f_{tc,c\ pris} / f_{tc,c\ cyl}$	98/90	N/mm <sup>2</sup>
	Zugfestigkeit $f_{tc,t}$	3,5	N/mm <sup>2</sup>
	E-Modul $E_{tc}$	30450	N/mm <sup>2</sup>

## 2.2.2 Bewehrungen

Für die Stahlbetonbauteile wurde warmgewalzter, gerippter Betonstahl BSt 500S (A) nach DIN 488 mit den Durchmessern 8 mm und 16 mm eingesetzt. Da zur Ermittlung der Materialkennwerte keine Stahlproben vorlagen, sind vier Bewehrungsseisen Ø 8 mm und zwei Ø 16 mm aus unbelasteten Betonplatten herausgetrennt und ihre mechanischen Eigenschaften (s. Tabelle 2) in Zugversuchen nach DIN 488-3 bestimmt worden. Mit den gewonnen, welligen Proben kann zwar die Streckgrenze und die Zugfestigkeit des Stahls sicher ermittelt werden, jedoch nicht der Elastizitätsmodul. Für die weiteren Betrachtungen wird daher der normativ vorgeschriebene Wert von 200.000 N/mm<sup>2</sup> angesetzt. Bei der Modellierung wurde die Verfestigung des Stahls nach Überschreiten der Streckgrenze nicht berücksichtigt, da sie im relevanten Dehnungsbereich (bis 25 ‰) sehr gering ist (siehe Tabelle 2).

Das Carbondtextil NWM3-019-09-b1 wurde vom Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungstechnik der TU Dresden mit einer Multiaxial-Nähwirkmaschine Typ 14024 der Firma Karl Mayer Malimo Textilmaschinenfabrik GmbH mit einer Online-Beschichtungseinheit hergestellt. Für das Textil mit der Bindung Trikot gegenlegig wurden Carbonrovings der Toho Tenax Europe GmbH mit einer Feinheit von 800 tex im orthogonalen Raster von 7,2 mm x 18 mm verarbeitet. Zur Verbesserung des Verbundverhaltens an den Grenzflächen zwischen den Filamenten und zwischen Garn und Betonmatrix beschichtete die Online-Einheit die Garne mit einer selbstvernetzenden, auf carboxylierten Styrol-Butadien-Copolymeren basierenden wässrigen Dispersion (entwickelt von MÄDERER ET AL. [11], KÖCKRITZ [12]). Zur Bestimmung der Materialkennlinie des Textils im Zusammenwirken mit dem Feinbeton wurden vier Zugversuche an zweilagig bewehrten Dehnkörpern mit einem Versuchs-

<sup>3</sup> Aufgrund fehlender Messungswerte wird die normativ vorgeschriebene Bruch- bzw. Grenzdehnung angenommen.

<sup>4</sup> Bedeutung der Indizes: tc...textile concrete, ft...flexural tension, c...compression, t...tension

aufbau nach JESSE [13] durchgeführt. Die Ermittlung der  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Beziehung eines Zugstabes mit den Abmessungen 600 mm x 60 mm x 8 mm (L/B/D) erfolgt durch Kraft-Weg-Messungen innerhalb eines mittig angeordneten Messbereiches mit einer Länge von 200 mm. Die gemessenen  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Linien einschließlich des gemittelten Verlaufs sind in Bild 2 illustriert. Die Bestimmung der in Tabelle 2 dargestellten Textilkennwerte erfolgt im nächsten Kapitel.

**Tabelle 2:** Kennwerte der verwendeten Bewehrungen (Mittelwerte)

**Table 2:** Properties of the applied reinforcements (mean values)

Stahl	Durchmesser $\varnothing$	8	16	mm
	E-Modul $E_s$	200000	200000	N/mm <sup>2</sup>
	Streckgrenze $f_y$	661	545	N/mm <sup>2</sup>
	Fließdehnung $\varepsilon_y$	3,31	2,73	‰
	Festigkeit $f_{s,25\%}$	669	552	N/mm <sup>2</sup>
	Dehnung $\varepsilon_{su,cal}$	25	25	‰
	Zugfestigkeit $f_{s,t}$	722	650	N/mm <sup>2</sup>
	Bruchdehnung $\varepsilon_{su}$	70	120	‰
Textil <sup>5</sup>	Spannung $\sigma_{t,und}$	200		N/mm <sup>2</sup>
	Dehnung $\varepsilon_{t,und}$	3		‰
	Zugfestigkeit $f_t$ bzw. $\sigma_{tu}$	1427		N/mm <sup>2</sup>
	Bruchdehnung $\varepsilon_{tu}$	10,0		‰

### 2.2.3 Numerische Simulation von Dehnkörpern mit FEM

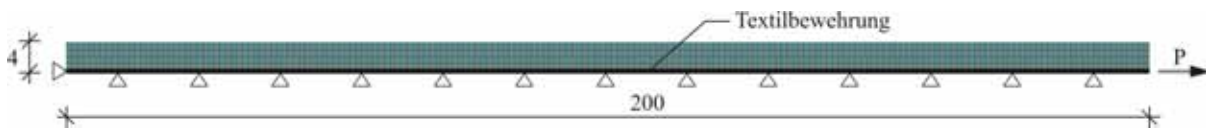
Von JESSE [13] wurde in Zugversuchen nachgewiesen, dass die Spannungs-Dehnungs-Beziehung eines im Feinbeton eingebundenen Textils sich deutlich von der Arbeitslinie eines einzeln betrachteten Textilgarns unterscheidet. So weisen Textilien im Beton geringere Zugfestigkeiten als einzelne Textilgarne auf. Ursache dafür können z. B. die Schädigung von Filamenten bei der Textilherstellung und während der Rissbildung des Betons sowie ungleiche Belastungen der Rovings sein.

Für das Beschreiben von Zugkörperversuchen existiert eine Vielzahl analytischer und numerischer Modelle (HARTIG [14]). Für die Berechnung von biegebeanspruchten Bauteilen wird – analog zum Bewehrungsstahl – eine Textilkennlinie benötigt, die für ein homogenes Material mit einem gleichmäßig beanspruchten, unter Belastung unveränderlichen Querschnitt gilt. Effekte wie z. B. ungleiche Beanspruchung von Filamenten und Schädigung von Garnen während der Betonrissbildung werden mit der gesuchten Textilkennlinie verschmiert berücksichtigt. Sie kann derzeit nur indirekt, z. B. durch eine numerische Simulation eines Dehn-

<sup>5</sup> Bedeutung der Indizes: t...textile, und...undulation (Welligkeit), u...ultimate

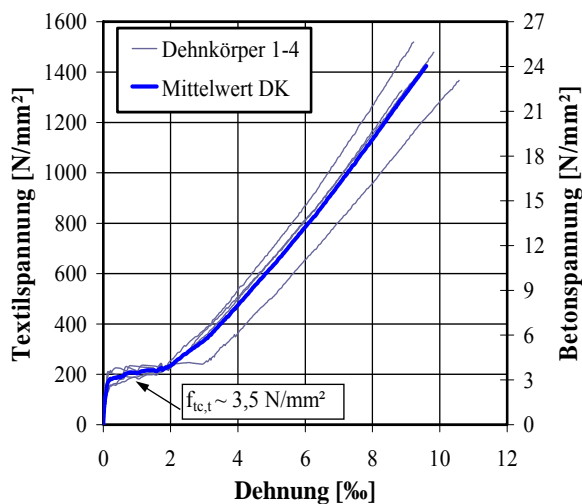
körpersversuches, bestimmt werden. Dafür kam das Programm Atena 2D<sup>6</sup> zum Einsatz. Der Dehnkörper wurde in einem zweidimensionalen Entwurfsraum in Anlehnung an den im Versuch gewählten Messbereich mit einer Länge von 200 mm modelliert. Aufgrund der symmetrischen Ausbildung und Belastung des Zugstabes ist es ausreichend, nur eine Plattenhälfte mit den Maßen 200 mm x 60 mm x 4 mm (L/B/D) zu betrachten und zu analysieren. Die Ergebnisse sind auf den gesamten Probekörper übertragbar. Bild 1 zeigt das FE-Modell mit der Textilbewehrung. Sie wird durch diskrete Stabelemente dargestellt, die über Verbundgesetze mit den Betonelementen verknüpft sind (ČERVENKA ET AL. [15]). Bei der Nachrechnung der mittleren Spannungs-Dehnungs-Linie aus vier Dehnkörperversuchen (Mittelwert DK, Bild 2) ist vereinfacht ein starrer Verbund zwischen Beton und Bewehrung angesetzt. Der Feinbeton wird als homogenes isotropes Material modelliert und weist im Zugbereich bis zum Erreichen der Zugfestigkeit eine lineare Zunahme der Dehnung auf.

Die FE-Analyse hat gezeigt, dass unter Annahme einer bilinearen Textilkennlinie der gemessene mittlere  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Verlauf der Dehnkörperversuche gut nachgebildet werden kann (siehe Bild 3). Damit sind Berechnungen von verstärkten Stahlbetonplatten mit einer Textilarbeitslinie ohne zugversteifenden Einfluss des Feinbetons möglich. Die Kennwerte der bilinearen Kennlinie  $\sigma_{t,und} / \varepsilon_{t,und}$  und  $f_t / \varepsilon_t$  sind in Tabelle 2 aufgeführt.



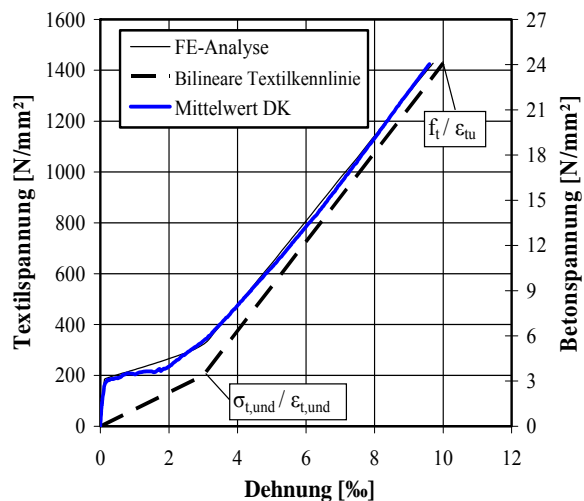
**Bild 1:** FE-Modell eines Dehnkörpers, Belastung und Lagerungsbedingungen

**Fig. 1:** FE-Model of tensile specimen, loading and supports



**Bild 2:** Spannungs-Dehnung-Bez. Dehnkörper

**Fig. 2:** stress-strain laws tensile specimens



**Bild 3:** Vergleich FE-Analyse/DK-Versuche

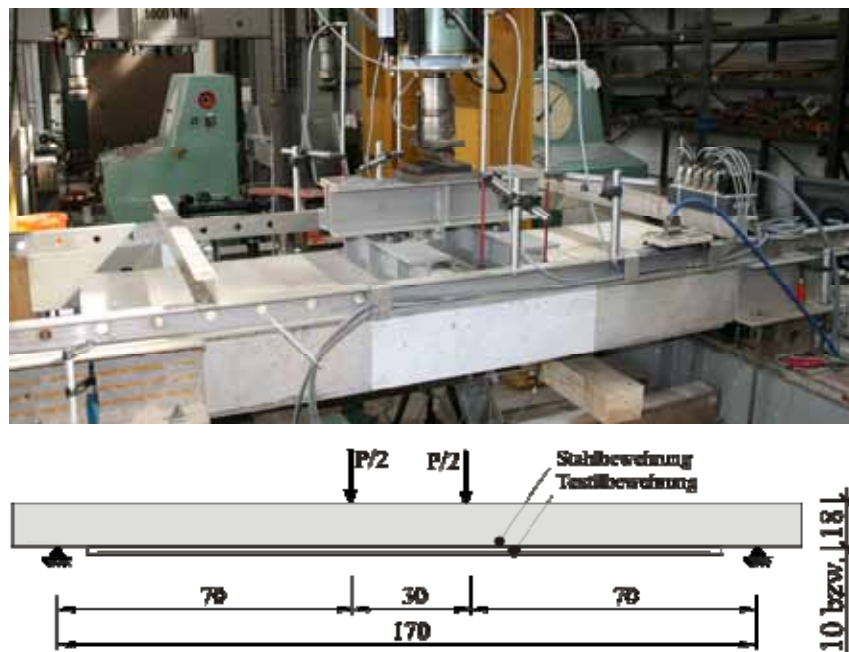
**Fig. 3:** comparison FE-Analysis/tensile tests

<sup>6</sup> Atena 2D, Version 4.2.2.0, Červenka Consulting Ltd., Prague, Czech Republic

## 2.3 Versuche

### 2.3.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Der Aufbau des Versuchsstandes und die Plattenprüfung im Vierpunkt-Biegeversuch erfolgte ähnlich den Ausführungen von BÖSCHE [3] und WEILAND [6]. Die Zylinderkraft  $P$  wurde über eine Traverse auf zwei Querbalken aufgeteilt. Da zwischen diesen beiden Lasteinleitungsbereichen ein konstantes Moment und keine Querkraft vorliegen und es damit keine Wechselwirkungen zwischen den beiden Schnittgrößen gibt, ist der Vierpunkt-Biegeversuch besonders gut für rechnerische Betrachtungen zum Biegetragverhalten geeignet. Der Prüfstand mit einer verstärkten Stahlbetonplatte und das statische System sind in Bild 4 zu sehen.



**Bild 4:** Versuchsstand und statisches System der verstärkten Stahlbetonplatten

**Fig. 4:** Test set up and structural system of the strengthened concrete slabs

In Tabelle 3 sind die Kennwerte der geprüften Platten zusammengestellt. Die Platten der Gruppe P1 (10 cm dick) und P2 bis P4 weisen einen Stahlbewehrungsgrad von 0,34 % bzw. 0,37 %, Gruppe P5 von 0,56 % auf. Die Platten 05 bis 15 haben eine Dicke von 18 cm. Sie unterscheiden sich in der statischen Höhe und dem Bewehrungsdurchmesser. In jeder Gruppe wurde jeweils eine Platte ein- und zweilagig, in Gruppe P1 auch dreilagig verstärkt. Die Verstärkung der Platten erfolgte schichtenweise im Laminierverfahren. Dabei wird eine Lage Textil, mittig liegend etwa von einer 6 mm dicken Feinbetonschicht umschlossen. Die sich daraus ergebende mittlere statische Höhe  $d_i$  und der innere Hebelarm zwischen Textil- und Stahlbewehrung  $z_{ts1}$  sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Mit der Vielzahl von sich ändern-

den Parametern wird somit die Eignung und Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens überprüft.

**Tabelle 3:** Übersicht über die geprüften Platten

**Table 3:** Overview about the loaded slabs

Nr.	$h$ [cm]	$h_t$ [mm]	BSt 500 S [Stk./mm]	$A_{s,vorh}$ [cm <sup>2</sup> ]	$d_s$ [cm]	$\rho_s$ [%]	$n$ [No.]	$A_{t,vorh}$ [cm <sup>2</sup> ]	$d_t$ [cm]	$z_{ts1}$ [cm]	$z_{ts1} / d_t$ [-]	$M_u$ [kNm]
P1-01	10	-	4Ø8	2,01	8,1	0,34	-	-	-	-	-	11,0
P1-02	10	6	4Ø8	2,01	8,1	0,34	1	0,37	10,30	2,20	0,214	15,9
P1-03	10	9	4Ø8	2,01	8,1	0,34	2	0,74	10,45	2,35	0,225	21,4
P1-04	10	12	4Ø8	2,01	8,1	0,34	3	1,11	10,60	2,50	0,236	28,2
P2-05	18	-	8Ø8	4,02	16,1	0,37	-	-	-	-	-	44,1
P2-06	18	6	8Ø8	4,02	16,1	0,37	1	0,37	18,30	2,20	0,120	51,8
P2-07	18	9	8Ø8	4,02	16,1	0,37	2	0,74	18,45	2,35	0,127	58,3
P3-08	18	-	8Ø8	4,02	14,1	0,37	-	-	-	-	-	38,5
P3-09	18	6	8Ø8	4,02	14,1	0,37	1	0,37	18,30	4,20	0,230	46,9
P3-10	18	9	8Ø8	4,02	14,1	0,37	2	0,74	18,45	4,35	0,236	55,0
P4-11	18	-	2Ø16	4,02	14,2	0,37	-	-	-	-	-	31,5
P4-12	18	6	2Ø16	4,02	14,2	0,37	1	0,37	18,30	4,10	0,224	41,0
P4-13	18	9	2Ø16	4,02	14,2	0,37	2	0,74	18,45	4,25	0,230	48,9
P5-14	18	-	3Ø16	6,03	14,2	0,56	-	-	-	-	-	47,3
P5-15	18	6	3Ø16	6,03	14,2	0,56	1	0,37	18,30	4,10	0,224	54,5

$h, h_t, n$	Dicke der unverst. Platte und der Textilbetonverstärkung, Lagenanzahl
$A_{s,vorh}, A_{t,vorh}, \rho_s$	Vorhandene Stahl- und Textilfläche, geometrischer Stahlbewehrungsgrad
$d_s, d_t, z_{ts1}$	Statische Höhe und Abstand zwischen Stahl- und Textilbewehrung
$M_u$	Fließ- bzw. Bruchmoment <sup>7</sup>

### 2.3.2 Versuchsergebnisse

Bild 5 veranschaulicht beispielhaft für die Gruppen P1 und P3 die gemessenen (geglätteten) Kraft/Momenten-Durchbiegungs-Verläufe von Messungen in Plattenmitte. Die bestimmten Bruchmomente aller Platten sind in Tabelle 3 aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass mit zunehmendem Verstärkungsgrad die Tragfähigkeit der Platten steigt. Bei der dreilagig verstärkten Platte konnte zum Beispiel eine Erhöhung der Tragfähigkeit von 156 % gegenüber der unverstärkten Referenzplatte erzielt werden. Die Kraft-Durchbiegungs-Linie lässt sich aufgrund deutlich unterschiedlicher Anstiege in drei Bereiche einteilen (Bild 5). Der Bereich ① ist durch einen großen Anstieg der Kurve bis zum Aufreißen des Betonquerschnitts gekennzeichnet. Der daraus folgende Steifigkeitsverlust der Platte führt zu einem kleineren Kurvenanstieg im Bereich ②. Mit Eintreten der Plastifizierung des Bewehrungsstahls nimmt der Querschnitt im Bereich ③ relativ geringe zusätzliche Lasten auf (BÖSCHE [3], WEILAND [6]).

<sup>7</sup> Für die unverstärkten Platten ist das Moment aufgeführt, unter dem der Stahl zu fließen beginnt.

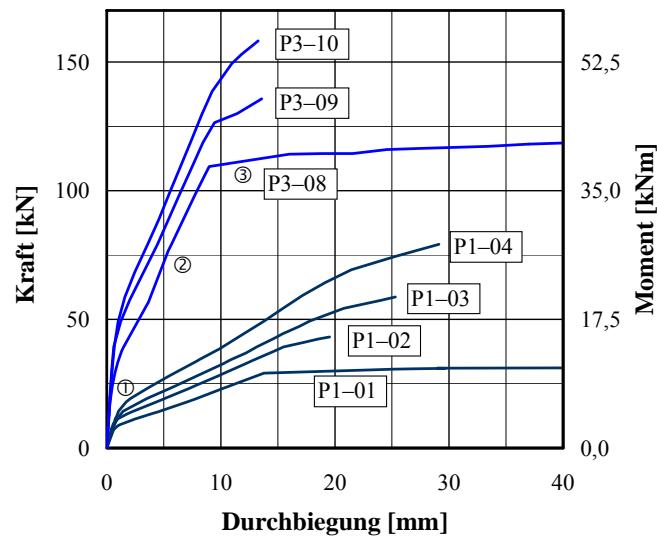


Bild 5: Kraft/Momenten-Durchbiegungs-Verläufe

Fig. 5: Force/moment-deflection-relations

### 3 Berechnungs- und Bemessungsverfahren, Bemessungstabellen

#### 3.1 Berechnungsverfahren ohne Berücksichtigung der Vorbelastung

BÖSCHE [3] und LAÏSSOUB [16] entwickelten basierend auf der Stahlbetonbemessung nach DIN 1045-1 ein additives Berechnungsmodell für mit Textilbeton bzw. TFC-Gewebe verstärkte Stahlbetonbauteile und ermittelten das zu erwartende Bruchmoment bzw. die erforderliche Textilfläche iterativ mit einem Algorithmus, der für die folgenden Berechnungen in ein gewöhnliches Tabellenkalkulationsprogramm implementiert wurde. Dabei werden Dehnungs- und Spannungszustände des vorbelasteten unverstärkten Bauteils nicht berücksichtigt.

Für die Berechnungen werden folgende Annahmen bzw. Vereinfachungen getroffen:

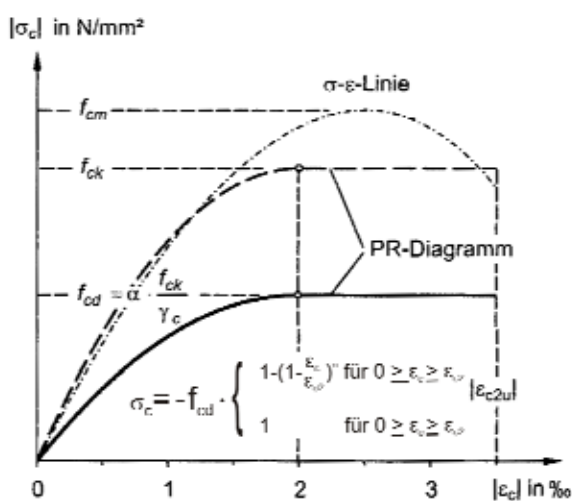
- Lineare Dehnungsverteilung über den Querschnitt und dessen Ebenbleiben unter Beanspruchung (Hypothese von BERNOULLI) bei gleichzeitiger Vernachlässigung der Schubverformungen. Äquidistante Querschnittsfasern (im Bezug zur Nulllinie) erfahren unabhängig vom Material gleiche Dehnungen. Die Berechnungsmethode ist damit auf schlanke Bauteile beschränkt.
- Die Betrachtung erfolgt am gerissenen Betonquerschnitt und unter Vernachlässigung der Betonzugfestigkeiten. Zugkräfte werden allein durch den Bewehrungsstahl und das Textil aufgenommen.

Die Eignung des Berechnungsmodells wird durch die Versuchsnachrechnung mit den idealisierten Materialkennlinien gemäß den Bildern 6 und 7 für Beton und die Bewehrung (modifiziert nach ZILCH [17]) unter Anwendung der Werte gemäß Tabelle 3 geprüft. Für die



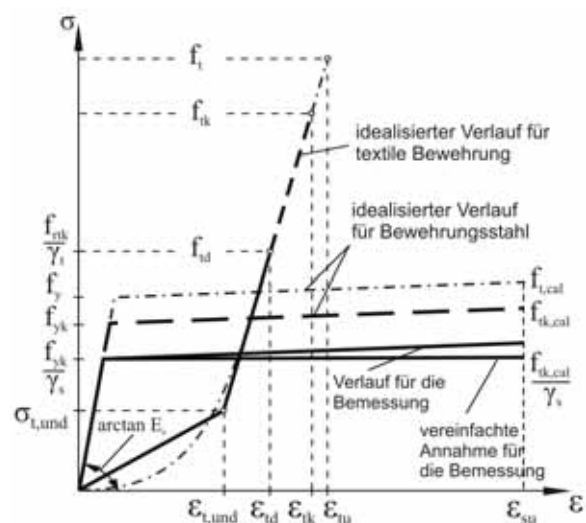
Betonkennlinie kommt das Parabel-Rechteck-Diagramm, für den Stahl und das Textil eine bilineare Arbeitslinie zum Einsatz.

Ein Querschnitt hat die maximale Tragfähigkeit erreicht, wenn entweder die Grenzdehnung des Altbetons  $\varepsilon_{cu}$  (Druckversagen), des Stahls  $\varepsilon_{su}$  oder des Textils  $\varepsilon_{tu}$  (Zugversagen) erreicht ist. Jede Dehnungsebene wird aus mindestens einer der Grenzdehnungen gebildet. Es wird diejenige Dehnungsverteilung ermittelt, bei der die äußeren Schnittgrößen mit den inneren Schnittkräften unter Berücksichtigung der vorhandenen Bewehrungsmengen im Gleichgewicht stehen. Für die Versuchsnachrechnung werden die Bruchdehnungen aus den Materialprüfungen gemäß Tabelle 1 und 2 als Kennwerte angesetzt. Bild 8 zeigt die inneren



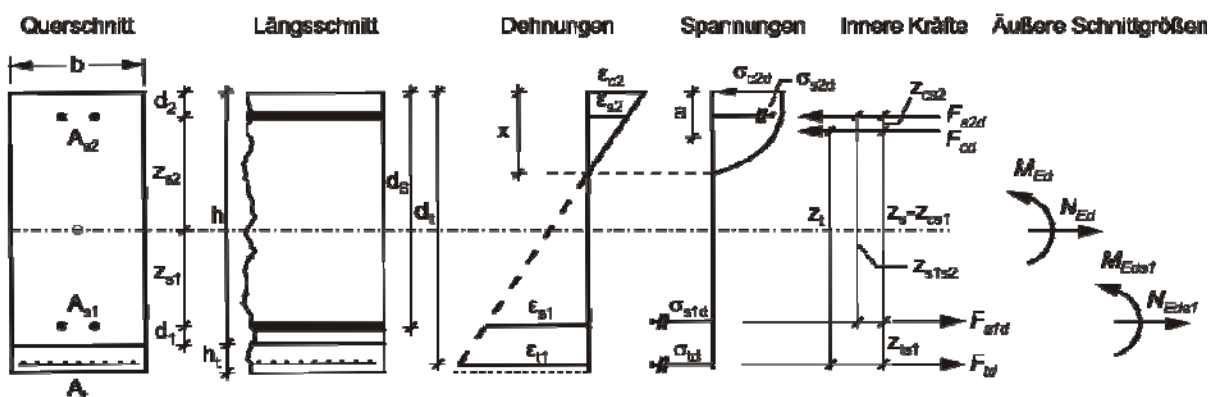
### Bild 6: Materialkennlinie (Alt-)Beton

**Fig. 6:** Stress-strain relations for concretes



**Bild 7:** Materialkennlinien für Stahl und Textil

**Fig. 7:** Stress-strain-relations for reinforcements



**Bild 8:** Dehnungen, Spannungen, innere und äußere Kräfte an einem verstärkten Querschnitt.

**Fig. 8:** Strain, stress, inner and external forces of a strengthened section

und äußeren Kräfte<sup>8</sup> sowie die Dehnungs- und Spannungsverläufe an einem verstärkten Balken mit Rechteckquerschnitt. Es gelten damit die Gleichungen (1) und (2) für das horizontale Kräfte- und Momentengleichgewicht in Höhe der Stahlzugbewehrung. Die Definition der Größen  $N_{Ed}, M_{Ed}, N_{Eds1}, M_{Eds1}, z_{s1}, z_{s2}, h, h_t, b, d_1, d_2, d_s, d_t, z_s, z_t, z_{ts1}, z_{s1s2}, z_{cs2}$  ist Bild 8 und z. B. ZILCH [17] entnehmbar.

$$N_{Ed} = F_{td} + F_{s1d} - F_{s2d} - F_{cd} \quad \rightarrow \quad F_{td} = N_{Ed} - F_{s1d} + F_{s2d} + F_{cd} \quad (1)$$

$$M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_{s1} = F_{td} \cdot z_{ts1} + F_{s2d} \cdot z_{s1s2} + F_{cd} \cdot z_s \quad \rightarrow \quad F_{td} = \frac{M_{Eds1} - F_{s2d} \cdot z_{s1s2} - F_{cd} \cdot z_s}{z_{ts1}} \quad (2)$$

Des Weiteren sind:

$F_{td}, F_{s1d}, F_{s2d}, F_{cd}$  Innere Kräfte der Textil, Stahlzug- und -druckbewehrung, Beton

$\sigma_{c2d}, \sigma_{s2d}, \sigma_{s1d}, \sigma_{td}$  Beton-, Stahldruck-, Stahlzug- und Textilspannungen

$\varepsilon_{c2}, \varepsilon_{s2}, \varepsilon_{s1}, \varepsilon_{t1}$  Dehnungen in Höhe des Betonrandes, der Stahldruck-, Stahlzug- und Textilbewehrung des verstärkten Querschnittes

Aus den bisherigen Betrachtungen wird deutlich, dass für die Bestimmung der fünf unbekannten Größen ( $F_{td}, F_{s1d}, F_{s2d}, F_{cd}, z_s$ ) zunächst nur die beiden Gleichungen (1) und (2) zur Verfügung stehen. Eine eindeutige Lösung ist nur durch Einführung von drei weiteren Bedingungen möglich. Hierzu wird die Beschreibung der linearen Dehnungsebene mit den vier unabhängigen Größen  $\varepsilon_{c2}, \varepsilon_{s2}, \varepsilon_{s1}, \varepsilon_t$  nötig. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit wird definitionsgemäß entweder der Grenzwert der Zugdehnung für die Bewehrung  $\varepsilon_{su}, \varepsilon_{tu}$  oder die Betondruckzone  $\varepsilon_{c2u}$  erreicht. Mit dieser Annahme und den beiden geometrischen Abhängigkeiten nach Gl. (3) und (4) wird die Dehnungsverteilung und damit das Berechnungsergebnis eindeutig festgelegt.

$$\varepsilon_{t1} = \varepsilon_{s1} + (\varepsilon_{s1} - \varepsilon_{c2}) \cdot z_{ts1} / d_s \quad (3)$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{c2} + (\varepsilon_{s1} - \varepsilon_{c2}) \cdot d_2 / d_s \quad (4)$$

Diese Vorgehensweise erfordert aufwendige Iterationen zur Bestimmung der Dehnungsebene. Dennoch wird fortführend gezeigt, dass für eine einfache Handhabung Bemessungstabellen aufgestellt werden können. Da bei den geprüften Platten weder eine Druckbewehrung vorliegt noch eine Normalkraft angreift, bleiben diese beiden Komponenten in den folgenden Berechnungen unberücksichtigt.

<sup>8</sup> Vorzeichendefinition: Alle inneren Kräfte und äußere Schnittgrößen wirken positiv in die auf Bild 8 dargestellte Richtung. Druckspannungen erhalten ein negatives, Zugspannungen ein positives Vorzeichen.

### 3.2 Anwendung des Berechnungsverfahrens auf die Versuchsergebnisse

Tabelle 4 zeigt die Berechnungsergebnisse der erforderlichen Stahl- bzw. Textilflächen  $A_{s/t}$  aus den experimentell ermittelten Bruchmomenten  $M_u$  sowie die prozentualen Abweichungen  $\Delta A_{s/t}$  zu den vorhandenen Bewehrungsflächen  $A_{s/t,vorh}$ . Die rechnerisch bestimmten Kennwerte der Dehnungsebene  $\varepsilon_{c2}$  und  $\varepsilon_{s1}$  sind ebenfalls aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass zur Aufnahme des Bruchmomentes die rechnerisch erforderliche Bewehrungsfläche größer ist als die vorhandene. Das bedeutet, dass die Tragfähigkeit der Platten mit dem gewählten Berechnungsverfahren unterschätzt wird. Eine einzige Ausnahme davon ist die Platte P2–07 mit -1,4 % Abweichung. Tabelle 4 zeigt jedoch auch, dass die Abweichungen bis zu 51 % groß und unterschiedlich über die Platten gestreut sind. Eine genaue Ursache dafür konnte bisher aufgrund der geringen Plattenanzahl und der Vielzahl veränderlicher Parameter nicht herausgearbeitet werden. Resümierend wird die gewählte Vorgehensweise (Ermittlung der Materialkennwerte, Berechnungsverfahren) zur Bestimmung der Textilfläche für textilbetonverstärkte Bauteile als geeignet bewertet und ergänzt damit die Ergebnisse von BÖSCHE [3].

**Tabelle 4:** Übersicht – Berechnung der erforderlichen Bewehrungsfläche

**Table 4:** Overview – computation of the required areas of reinforcement

Nr.	Vergleichs- wert		Eingangswerte				Berechnungsergebnisse				
	$n$ [No.]	$A_{s/t,vorh}$ [cm <sup>2</sup> ]	$M_u$ [kNm]	$A_{s,vorh}$ [cm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon_{t1}$ [‰]	$\sigma_{tu}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon_{c2}$ [‰]	$\varepsilon_{s1}$ [‰]	$\sigma_{s1}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A_{s/t}$ [cm <sup>2</sup> ]	$\Delta A_{s/t}$ [%]
P1–01	-	2,01	12,0	-	-	-	-0,92	3,31	661	2,24	11,4
P1–02	1	0,37	16,0	2,01	10,0	1427	-1,67	7,51	661	0,43	16,2
P1–03	2	0,74	21,4	2,01	10,0	1427	-1,98	7,30	661	0,82	10,8
P1–04	3	1,11	28,6	2,01	10,0	1427	-2,42	7,07	661	1,35	21,6
P2–05	-	4,02	47,3	-	-	-	-0,96	3,31	661	4,82	19,9
P2–06	1	0,37	52,8	4,02	10,0	1427	-1,65	8,60	661	0,50	35,1
P2–07	2	0,74	58,3	4,02	10,0	1427	-1,75	8,50	661	0,73	-1,4
P3–08	-	4,02	42,9	-	-	-	-1,08	3,31	661	5,04	25,4
P3–09	1	0,37	48,9	4,02	10,0	1427	-1,68	7,32	661	0,56	51,3
P3–10	2	0,74	57,1	4,02	10,0	1427	-1,83	7,21	661	0,90	21,6
P4–11	-	4,02	34,6	-	-	-	-0,85	2,73	545	4,87	21,1
P4–12	1	0,37	42,0	4,02	10,0	1427	-1,50	7,42	545	0,51	37,8
P4–13	2	0,74	49,0	4,02	10,0	1427	-1,62	7,32	545	0,80	8,1
P5–14	-	6,03	52,8	-	-	-	-1,13	2,73	545	7,61	26,2
P5–15	1	0,37	57,0	6,03	10,0	1427	-1,89	7,34	545	0,56	51,4

### 3.3 Berechnungsverfahren mit Berücksichtigung der Vorbelastung

Das Berechnungsmodell wird für die Untersuchung der Biegetragfähigkeit des verstärkten Bauteils mit Vorbelastung erweitert. Dazu werden die Dehnungskennwerte des vorbelasteten Querschnitts  $\varepsilon_{c2o}, \varepsilon_{s2o}, \varepsilon_{s1o}, \varepsilon_{t1o}$  gemäß Bild 9 eingeführt. Es sind:

$\varepsilon_{c2o}, \varepsilon_{s2o}, \varepsilon_{s1o}, \varepsilon_{t1o}$  Dehnungen in Höhe des Betonrandes, der Stahldruck-, Stahlzug- und vorgesehenen Textilbewehrung des unverstärkten Querschnittes

$\Delta\varepsilon_{c2}, \Delta\varepsilon_{s2}, \Delta\varepsilon_{s1}, \Delta\varepsilon_{t1}$  Dehnungszuwächse infolge zusätzlicher Lasten in Höhe des Betonrandes, der Stahldruck-, Stahlzug- und Textilbewehrung

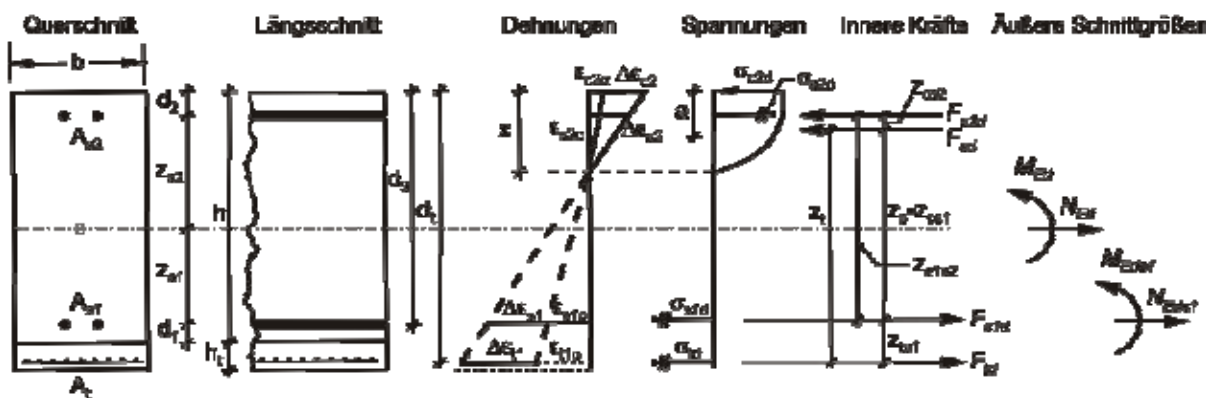
Die Dehnungen  $\varepsilon_{c2o}, \varepsilon_{s2o}, \varepsilon_{s1o}, \varepsilon_{t1o}$  des unverstärkten Querschnitts können aus den wirkenden Schnittgrößen und vorhandenen Bewehrungsflächen ermittelt werden.  $\varepsilon_{t1o}$  ist die fiktive Dehnung des unverstärkten Querschnittes in Höhe der aufzubringenden textilen Bewehrung. Sie wird über Gleichung (5) ermittelt. Für die Dehnungen des verstärkten Querschnitts gelten die Formeln (6) bis (8). Die Dehnungsebene und die zugehörigen inneren Kräfte des Querschnittes werden mit dem bereits vorgestellten Berechnungsverfahren unter Berücksichtigung von  $\varepsilon_{t1o}$  bestimmt.

$$\varepsilon_{t1o} = \varepsilon_{s1o} + (\varepsilon_{s1o} - \varepsilon_{c2o}) \cdot z_{ts1} / d_s \quad (5)$$

$$\varepsilon_{c2} = \varepsilon_{c2o} + \Delta\varepsilon_{c2} \quad \text{mit} \quad \varepsilon_{c2} \geq \varepsilon_{c2u} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{s2o} + \Delta\varepsilon_{s2} \quad \text{mit} \quad \varepsilon_{s2} \leq \varepsilon_{su} \quad \text{bzw.} \quad \varepsilon_{s1} = \varepsilon_{s1o} + \Delta\varepsilon_{s1} \quad \text{mit} \quad \varepsilon_{s1} \leq \varepsilon_{su} \quad (7)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{t1o} + \Delta\varepsilon_{t1} \quad \text{mit} \quad \Delta\varepsilon_{t1} \leq \varepsilon_{tu} \quad (8)$$



**Bild 9:** Dehnungen, Spannungen, innere und äußere Kräfte an einem verstärkten Querschnitt

**Fig. 9:** Strain, stress, inner and external forces of a strengthened section

### 3.4 Bemessungsverfahren

#### 3.4.1 Allgemeines

Ziel der Bemessung von Bauteilen ist es, die Querschnittsabmessungen und die Bewehrungsmenge derart festzulegen, dass im Grenzzustand der Tragfähigkeit eine ausreichende Sicherheit gegen Querschnittsversagen vorliegt. Die Bemessung erfolgt nach dem Teilsicherheitskonzept. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit sollte die Tragfähigkeit des Querschnittes im Grenzzustand vollständig ausgeschöpft werden. Das wird entweder durch die maximale Ausnutzung der Betondruck-, der Textil- oder Stahlzugfestigkeit erreicht. Für die Bemessung wird das bereits vorgestellte Berechnungsverfahren unter Ansatz der Bemessungswerte genutzt. Die normativ üblichen Werte sind in Tabelle 5 für Beton und Stahl zusammengefasst.

Die Prüfung der Dehnkörper hat für das Textil eine mittlere Zugfestigkeit von 1427 N/mm<sup>2</sup> ergeben. Aktuelle Vorschläge für die Ermittlung eines geeigneten Teilsicherheitsfaktors und die charakteristische Textilzugfestigkeit auf Grundlage statistischer Auswertungen führt SICKERT ET AL. [18] auf. Für die folgende Bemessung werden aufgrund fehlender statistischer Auswertungen die charakteristische Festigkeit mit 1300 N/mm<sup>2</sup> und der Sicherheitsbeiwert mit 2,1 angenommen. Dieser wurde in der Vergangenheit bei verschiedenen Praxisprojekten (z. B. [7], [19], [20]) bereits verwendet. Unter Anwendung des gewählten Sicherheitsbeiwertes ergibt sich die Bemessungszugfestigkeit  $f_{td}$  zu 619 N/mm<sup>2</sup>. Die aus der Textilkennlinie (Bild 7) ermittelbare zugehörige Bemessungsgrenzdehnung  $\varepsilon_{td}$  beträgt 5,39 ‰.

**Tabelle 5:** Bemessungskennwerte

**Table 5:** Design values

Altbeton	Zylinderdruckfestigkeit $f_{cm} / f_{ck} / f_{cd}$	36,3 / 28,3 / 16,0	N/mm <sup>2</sup>
	Abminderungsbeiwert $\alpha$	0,85	
	Sicherheitsbeiwert $\gamma_c$	1,5	
Bewehrungsstahl	E-Modul $E_s$	200000	N/mm <sup>2</sup>
	Sicherheitsbeiwert $\gamma_s$	1,15	
	Streckgrenze $f_{yk} / f_{yd}$	500 / 435	N/mm <sup>2</sup>
	Fließdehnung $\varepsilon_{yk} / \varepsilon_{yd}$	2,50 / 2,18	‰
	Festigkeit $f_{tk,cal} / f_{td,cal}$	500 / 435	N/mm <sup>2</sup>
	Dehnung $\varepsilon_{su,cal}$	25	‰
Textil	Zugfestigkeit $f_{tk}$	1300	N/mm <sup>2</sup>
	Sicherheitsbeiwert $\gamma_t$	2,1	
	Zugfestigkeit $f_{td}$	619	N/mm <sup>2</sup>
	Bruchdehnung $\varepsilon_{td}$	5,39	‰

### 3.4.2 Entwicklung von Bemessungstabellen

Mit den Bemessungswerten und auf Grundlage des vorgestellten Rechenverfahrens können für textilbetonverstärkte Bauteile unter Biegebeanspruchung tabellarische Bemessungshilfen aufgestellt werden. Eine ähnliche Herangehensweise wählte LAÏSSOUB [16]. Es gelten für die nachfolgende allgemeine Herleitung neben den bereits definierten und allgemein bekannten Parametern wie  $x$ ,  $\alpha_R$ ,  $M_{Eds1}$ ,  $F_{cd}$  und  $z_s$  (ZILCH [17]) folgende Definitionen:

$\mu_t, \omega_t$  bezogenes Moment, mechanischer Bewehrungsgrad

$$\xi_t = \frac{x}{d_t}, \quad \zeta_t = \frac{z_s}{d_t} \quad \text{bezogene Druckzonenhöhe, bezogener Hebelarm} \quad (9)$$

$$F_{cd} \cdot z_s = \alpha_R \cdot \xi_t \cdot b \cdot d_t \cdot f_{cd} \cdot z_s \cdot \frac{d_t}{d_t} = b \cdot d_t^2 \cdot f_{cd} \cdot \alpha_R \cdot \xi_t \cdot \zeta_t \quad (10)$$

Gleichsetzen der Formeln (1) und (2) führt zu der Beziehung:

$$M_{Eds1} - F_{s2d} \cdot z_{s1s2} + F_{s1d} \cdot z_{ts1} = F_{cd} \cdot z_s + F_{cd} \cdot z_{ts1} + (N_{Ed} + F_{s2d}) \cdot z_{ts1} \quad (11)$$

Einfügen der Gleichungen (9) und (10) in (11) ergibt die Ausdrücke (12) und (13). Dabei wird das bezogene Moment  $\mu_t$  eingeführt.

$$M_{Eds1} - F_{s2d} \cdot z_{s1s2} + F_{s1d} \cdot z_{ts1} = \alpha_R \cdot \xi_t \cdot \zeta_t \cdot b \cdot d_t^2 \cdot f_{cd} + \alpha_R \cdot \xi_t \cdot b \cdot d_t^2 \cdot f_{cd} \cdot \frac{z_{ts1}}{d_t} + (N_{Ed} + F_{s2d}) \cdot z_{ts1} \quad (12)$$

$$\mu_t = \frac{M_{Eds1} - F_{s2d} \cdot z_{s1s2} + F_{s1d} \cdot z_{ts1}}{b \cdot d_t^2 \cdot f_{cd}} = \alpha_R \cdot \xi_t \cdot \zeta_t + \alpha_R \cdot \xi_t \cdot \frac{z_{ts1}}{d_t} + \frac{(N_{Ed} + F_{s2d}) \cdot z_{ts1}}{b \cdot d_t^2 \cdot f_{cd}} \quad (13)$$

Die Formel  $A_t = F_{td} / \sigma_{td}$  zur Bestimmung der Textilfläche ergibt mit Gleichung (2) den Bruch nach Gl. (14). Der Zähler wird mit  $F_{s1d} \cdot z_{ts1} - F_{s1d} \cdot z_{ts1}$  zu Gleichung (15) erweitert.

$$A_t = \frac{1}{\sigma_{td}} \cdot \frac{M_{Eds1} - F_{s2d} \cdot z_{s1s2} - F_{cd} \cdot z_s}{z_{ts1}} \quad (14)$$

$$A_t = \frac{1}{\sigma_{td}} \cdot \frac{b \cdot d_t^2 \cdot f_{cd} \cdot \frac{M_{Eds1} - F_{s2d} \cdot z_{s1s2} + F_{s1d} \cdot z_{ts1}}{b \cdot d_t^2 \cdot f_{cd}} - F_{cd} \cdot z_s}{z_{ts1}} - F_{s1d} \quad (15)$$

Mit Gl. (9) und (10) lässt sich die Textilfläche nach Gl. (16) und weiterführend nach Gleichung (17) bestimmen:

$$A_t = \frac{1}{\sigma_{td}} \cdot \frac{b \cdot d_t \cdot f_{cd} \cdot (\mu_t - \alpha_R \cdot \xi_t \cdot \zeta_t)}{z_{ts1} / d_t} - F_{s1d} \quad (16)$$

$$A_t = \frac{1}{\sigma_{td}} \cdot \frac{b \cdot d_t \cdot f_{cd} \cdot \left( \alpha_R \cdot \xi_t \cdot \zeta_t + \alpha_R \cdot \xi_t \cdot \frac{z_{ts1}}{d_t} + \frac{(N_{Ed} + F_{s2d}) \cdot z_{ts1}}{b \cdot d_t^2 \cdot f_{cd}} - \alpha_R \cdot \xi_t \cdot \zeta_t \right)}{z_{ts1} / d_t} - F_{s1d} \quad (17)$$

Mit Einführung des mechanischen Bewehrungsgrades  $\omega_t = \alpha_R \cdot \xi_t$  ist die Textilfläche vereinfacht mit der Formel (18) ermittelbar. Damit können den verschiedenen Dehnungszuständen die Beiwerte  $\mu_t$  und  $\omega_t$  zugeordnet und tabellarisch aufgelistet werden. Tabelle 6 zeigt die bestimmten Werte für  $z_{ts1} / d_t = 0,23$  für Bauteile ohne Vordehnung. Das gewählte  $z_{ts1} / d_t$ -Verhältnis liegt im Mittel und mit geringen Abweichungen bei allen Platten, außer denen der

$$A_t = \frac{1}{\sigma_{td}} \cdot (\omega_t \cdot b \cdot d_t \cdot f_{cd} - F_{s1d} + N_{Ed} + F_{s2d}) \quad (18)$$

**Tabelle 6:** Bemessungstabelle für das  $\omega_t$ -Verfahren mit  $z_{ts1} / d_t = 0,23$  mit  $\varepsilon_{t10} = 0$

**Table 6:** Design table of the  $\omega_t$  - method for  $z_{ts1} / d_t = 0,23$  mit  $\varepsilon_{t10} = 0$

$\mu_t$	$\omega_t$	$\xi_t$	$\zeta_t$	$\varepsilon_{c2d}$	$\varepsilon_{s1d}$	$\sigma_{s1d}$	$\varepsilon_{td}$	$\sigma_{td}$
[-]	[-]	[-]	[-]	[‰]	[‰]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[‰]	[N/mm <sup>2</sup> ]
0,02	0,0206	0,09	0,74	-0,52	4,03	435	5,39	619
0,04	0,0418	0,12	0,73	-0,77	3,97	435	5,39	619
0,06	0,0634	0,15	0,72	-0,98	3,92	435	5,39	619
0,08	0,0854	0,18	0,71	-1,18	3,88	435	5,39	619
0,10	0,1079	0,20	0,70	-1,38	3,83	435	5,39	619
0,12	0,1307	0,23	0,69	-1,57	3,79	435	5,39	619
0,14	0,1540	0,25	0,68	-1,77	3,74	435	5,39	619
0,16	0,1779	0,27	0,67	-1,98	3,70	435	5,39	619
0,18	0,2024	0,29	0,66	-2,20	3,64	435	5,39	619
0,20	0,2277	0,31	0,65	-2,45	3,59	435	5,39	619
0,22	0,2539	0,34	0,64	-2,73	3,52	435	5,39	619
0,24	0,2811	0,36	0,62	-3,03	3,45	435	5,39	619
0,26	0,3093	0,39	0,61	-3,38	3,37	435	5,39	619
0,2665	0,3187	0,39	0,61	-3,50	3,35	435	5,39	619
0,28	0,3391	0,42	0,60	-3,50	2,93	435	4,86	525
0,30	0,3706	0,46	0,58	-3,50	2,39	435	4,15	401
0,3087	0,3848	0,48	0,57	-3,50	2,17	434	3,86	351
0,32	0,4038	0,50	0,56	-3,50	1,90	381	3,52	291
0,3383	0,4359	0,54	0,55	-3,50	1,51	301	3,00	200
0,34	0,4390	0,54	0,54	-3,50	1,47	294	2,95	197
0,36	0,4768	0,59	0,52	-3,50	1,08	215	2,44	163
0,38	0,5189	0,64	0,50	-3,50	0,70	141	1,96	131
0,40	0,5627	0,70	0,48	-3,50	0,38	75	1,54	102

Textilversagen

Betonversagen

Gruppe P2, vor. Gekennzeichnet sind in Tabelle 6 die Dehnungen, bei denen Betondruckversagen, elastisches Stahlverhalten und eine geringe Textilsteifigkeit eintreten.

Wirkt beispielsweise auf die Platte P1–04 (Kennwerte siehe Tabelle 3) ein Moment von 12,9 kNm so bestimmt sich  $\mu_t$  nach Gl. (13) mit  $F_{s1d} = \sigma_{s1d} \cdot A_{s1} = 87,4 \text{ kN}$ ,  $f_{cd} = 16,0 \text{ N/mm}^2$ ,  $b = 60 \text{ cm}$ ,  $d_t = 10,6 \text{ cm}$  und  $z_{ts1} = 2,5 \text{ cm}$ , zu 0,1395. Nach Tabelle 6 ist  $\omega_t$  durch Interpolation zwischen den Werten  $\mu_t = 0,12$  und  $0,14$  zu 0,153 bestimmbar. Nach Gleichung (18) ergibt sich mit einer zulässigen Textilspannung von  $619 \text{ N/mm}^2$  die erforderliche Textilfläche zu  $1,10 \text{ cm}^2$ . Durch die Sicherheitsfaktoren auf der Widerstandsseite und dem Ansatz charakteristischer Materialkennwerte reduziert sich damit bei der dreilagig verstärkten Platte das aufnehmbare Moment  $M_u$  von 28,2 kNm auf 12,9 kNm; unter Ansatz eines mittleren Sicherheitsfaktors auf der Einwirkungsseite von beispielsweise  $\gamma_E = 1,4$  auf 9,2 kNm ( $M_{ud}$ ). Das experimentell gemessene Bruchmoment ( $M_u = 28,2 \text{ kNm}$ ) ist bei dieser Platte damit mehr als dreifach größer als das zulässige aufnehmbare Bemessungsmoment  $M_{Ed}$ .

Eine Bemessungstabelle gilt damit für eine bestimmte Beton-, Stahl- und Textilsorte, ein definiertes  $z_{ts1}/d_t$  und  $d_2/d_t$ -Verhältnis (bei Ansatz von Druckbewehrung) und für einen bestimmten Vordehnungszustand  $\varepsilon_{t1o}$ .

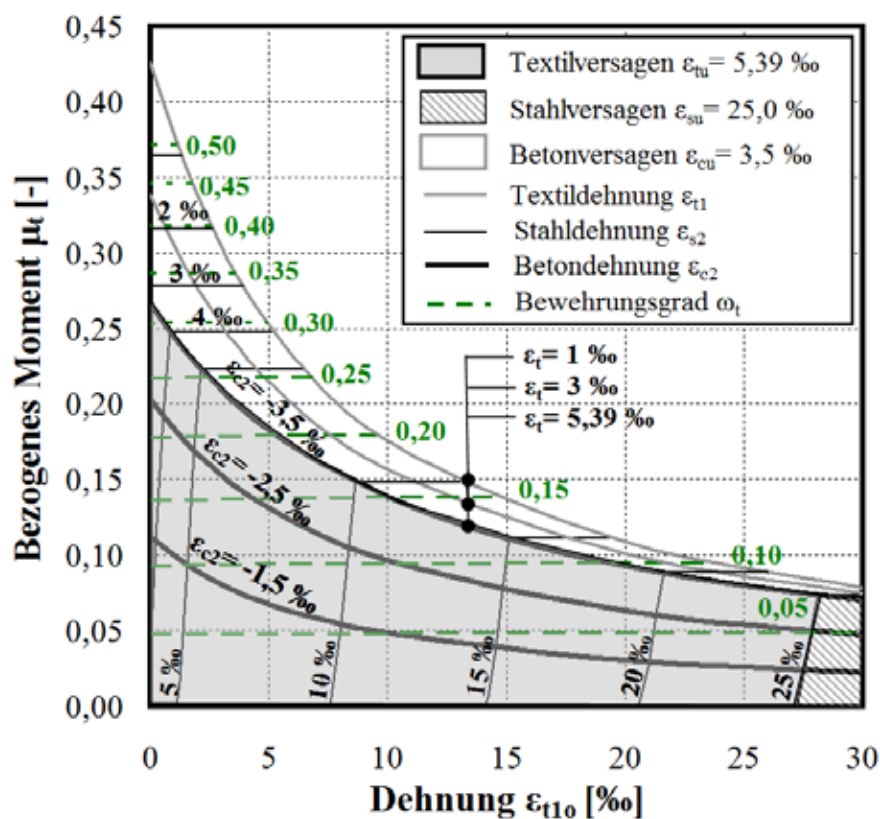
### 3.5 Bemessung unter Berücksichtigung der Vorbelastung

Das Diagramm in Bild 10 ermöglicht die Ermittlung der Beton-, Stahl-, und Textildehnung eines verstärkten biegebeanspruchten Stahlbetonquerschnittes im Grenzzustand der Tragfähigkeit in Abhängigkeit seiner Vor- und Endbelastung ( $z_{ts1}/d_t = 0,23$ ). Die Vorbelastung wird gemäß Gl. (5) durch den Dehnungswert  $\varepsilon_{t1o}$  und die Endbelastung gemäß Gl. (13) durch das bezogene Moment  $\mu_t$  ausgedrückt. Alternativ kann das Diagramm auch eingesetzt werden, um unter gegebener Vordehnung das maximal aufnehmbare Moment zu bestimmen. Dazu wird z. B. vorgegeben, dass die Beton- und die Textiltragfähigkeit maximal ausgenutzt sind. Bild 10 zeigt ebenfalls, bei welchen  $\varepsilon_{t1o}/\mu_t$ -Kombinationen, Betondruck-, Textilzug- oder Stahlzugversagen durch Erreichen der Bemessungsgrenzdehnungen vorliegt. Ist beispielsweise die Vordehnung  $\varepsilon_{t1o} = 5 \text{ ‰}$  und das bezogene Moment  $\mu_t = 0,1$ , dann ergeben sich gemäß Bild 10 etwa folgende Dehnungen im GZT:  $\varepsilon_{c2} = -2 \text{ ‰}$ ,  $\varepsilon_{s2} = 7,5 \text{ ‰}$ ,  $\varepsilon_{tu} = 5,39 \text{ ‰}$  (Textilversagen). Soll ein größeres Moment vom Querschnitt aufgenommen werden, z. B.  $\mu_t = 0,2$ , dann gilt im Grenzzustand:  $\varepsilon_{c2u} = -3,5 \text{ ‰}$ ,  $\varepsilon_{s2} = 6,1 \text{ ‰}$ ,  $\varepsilon_{t1} = 3,6 \text{ ‰}$  (Betonversagen).

Weiterhin kann dem Diagramm für jede  $\varepsilon_{t1o}/\mu_t$ -Kombinationen der mechanische Bewehrungsgrad  $\omega_t$  entnommen werden, mit dem nach Gleichung (18) die erforderliche Textilfläche bestimmt wird. Der sehr geringe, kaum erkennbare Anstieg einer  $\omega_t$ -Kote (z. B. 0,05)



bedeutet, dass mit zunehmender Vordehnung die erforderliche Textilfläche geringfügig kleiner wird. Ursache dafür ist die zunehmende Einschnürung der Druckzone und der damit größer werdende innere Hebelarm der Kräfte. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei einem Tragfähigkeitsvergleich zwischen ungeschädigten und vorbelasteten Platten mit gleicher textiler Verstärkung die vorgeschädigten Platten eine etwas größere Last aufnehmen können als die Ungeschädigten. Dieses rechnerisch ermittelte Ergebnis kann mit den Plattenprüfungen von WEILAND [6], WEILAND ET AL. [21] experimentell bestätigt werden. Für die Ermittlung der Textilfläche ist es jedoch ausreichend Bemessungstabellen ohne Berücksichtigung der Vordehnung aufzustellen.



**Bild 10:** Abhängigkeiten zwischen Vordehnung, bezogenem Moment und Dehnungen im GZT

**Fig. 10:** Dependence between Pre-strains, effective moment and strains of ultimate limit state

#### 4 Ausblick

Dieser Beitrag zeigt, dass das vorgestellte Berechnungsverfahren geeignet und die Erstellung von Bemessungstabellen für kleinformatige, textilbetonverstärkte Stahlbetonplatten möglich ist. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf große, praxisübliche Plattenabmessungen und

auch Balken mit und ohne Berücksichtigung von Druckbewehrung sollte durch geeignete Versuche und Nachrechnungen bereits verstärkter Bauteile bestätigt werden. Die Eignung des Berechnungsverfahrens ist zudem durch umfangreichere Bauteilprüfungen und -auswertungen sicherzustellen. Bemessungstabellen oder -diagramme können, z. B. im Rahmen eines Zulassungsverfahrens, für ein bestimmtes Textil erstellt werden. Sie ermöglichen eine schnelle und sichere Bestimmung der erforderlichen textilen Bewehrungsfläche im Zuge einer Verstärkungsmaßnahme.

## 5 Literatur

- [1] REINHARDT, H.-W.; KRÜGER, M.; BENTUR, A.; BRAMESHUBER, W.; BANHOLZER, B.; CURBACH, M.; JESSE, F.; MOBASHER, B.; PELED, A.; SCHORN, H.: Composite materials - 6.1. Bond. In: BRAMESHUBER, W. (Ed.): *Textile Reinforced Concrete – State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC*, RILEM Publications SARL, 2006, pp. 83-131
- [2] CURBACH, M.; ORTLEPP, R.; TRIANTAFILLOU, T. C.: TRC for Rehabilitation. In: BRAMESHUBER, W. (Ed.): *Textile Reinforced Concrete – State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC*, RILEM Publications SARL, 2006, pp. 221-236
- [3] BÖSCHE, A.: *Möglichkeiten zur Steigerung der Biegetragfähigkeit von Beton- und Stahlbetonbauteilen durch den Einsatz textiler Bewehrungen - Ansatz für ein Bemessungsmodell*. Technische Universität Dresden : Eigenverlag, 2007 – Dissertation
- [4] BÖSCHE, A.; ORTLEPP, R.; JESSE, F.: Innovationen für Verstärkungen. In: *Beiträge zum 48. DAfStb-Forschungskolloquium am 19. Oktober 2007 an der Technischen Universität Dresden*, Technische Universität Dresden : Eigenverlag, 2007, S. 21-34
- [5] BÖSCHE, A.; WEILAND, S.; ORTLEPP, R.; JESSE, F.; CURBACH, M.: Textile Reinforced Concrete for Flexural Strengthening of RC-Structures – Part 1: Structural Behaviour and Design Model. In: ACI SP-251-2: *Design & Applications of Textile-Reinforced Concrete.*, 2008, S. 19-40
- [6] WEILAND, S.: *Interaktion von Betonstahl und textiler Bewehrung bei der Biegeverstärkung mit textilbewehrtem Beton*. Technische Universität Dresden : Eigenverlag, 2009 – Dissertation
- [7] SCHLADITZ, F.; LORENZ, E.; CURBACH, M.: Biegetragfähigkeit von textilbetonverstärkten Stahlbetonplatten. In: *Beton- und Stahlbetonbau* Bd. 6 (2011), Nr. 106, S. 377-384
- [8] JESSE, F.; CURBACH, M.: *Verstärken mit Textilbeton*. In: BERGMEISTER, K.; FINGERLOOS, F.; WÖRNER, J.-D. (Hrsg.): *Betonkalender 2010*. 1. Auflage, Berlin : Ernst & Sohn, 2010, S. 457-565

- [9] HEGGER, J.; HORSTMANN, M.; VOSS, S.; WILL, N.: Textilbewehrter Beton – Tragverhalten, Bemessung und Anwendung. In: *Beton- und Stahlbetonbau* Bd. 6 (2007), Nr. 102, S. 362-370
- [10] HEGGER, J.; VOSS, S.: Investigations on bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. In: *Engineering Structures* Bd. (2008), Nr. 30, S. 2050-2056
- [11] MÄDER, E.; PLONKA, R.; GAO, S.-L.: Coatings for fibre and interphase modifications in a cementitious matrix. In: CURBACH, M. (Hrsg.): *Textile reinforced structures. Proceedings of the 2nd Colloquium on textile reinforced structures (CTRTS2)*, 29.-30.09.2010, Dresden, Germany, Technische Universität Dresden : Eigenverlag, 2003, S. 121-132
- [12] KÖCKRITZ, U.: *In-Situ Polymerbeschichtung zur Strukturstabilisierung offener nähgewirkter Gelege*. Technische Universität Dresden : Eigenverlag, 2007 – Dissertation
- [13] JESSE, F.: *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix*. Technische Universität Dresden : Eigenverlag, 2004 – Dissertation
- [14] HARTIG, J.: *Numerical investigations on the uniaxial tensile behaviour of textile reinforced concrete*. Technische Universität Dresden : Eigenverlag, 2011 – Dissertation
- [15] ČERVENKA, V.; JENDELE, L.: *Atena Program Documentation Part 1-Theory*, 2009
- [16] LAÏSSOUB, F.: *Die Bemessung von mit TFC-Gewebe verstärkten Betonbauteilen. Modellbetrachtungen auf der Basis von Versuchsergebnissen*. Technische Universität Darmstadt : Eigenverlag, 2004 – Dissertation
- [17] ZILCH, K.; ZEHETMAIER, G. M.: *Bemessung im konstruktiven Betonbau*. 1. Aufl. Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006
- [18] SICKERT, J.-U. ; SCHWITEILO, K.; JESSE, F.: Statistische Auswertung der Bruchspannung einaxialer Zugversuche an Textilbetonproben – Vorschläge für Teilsicherheitsbeiwerte. In: CURBACH, M. (Hrsg.); ORTLEPP, R. (Hrsg.): *Textilbeton in Theorie und Praxis: Tagungsband zum 6. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS6)*, Berlin, 19.-20.9.2011. SFB 528, TU Dresden, Eigenverlag, 2011, S. 141-155.
- [19] CURBACH, M.; HAUPTENBUCHER, B.; ORTLEPP, R.; WEILAND, S.: Textilbewehrter Beton zur Verstärkung eines Hyparschalengerüsts in Schweinfurt. In: *Beton- und Stahlbetonbau* Bd. 6 (2007), Nr. 102, S. 353-361
- [20] SCHLADITZ, F.; LORENZ, E.; JESSE, F.; CURBACH, M.: Verstärkung einer denkmalgeschützten Tonnenschale mit Textilbeton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* Bd. 7 (2009), Nr. 104, S. 432-437
- [21] WEILAND, S.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M.: Strengthening of Predeformed Slabs with Textile Reinforced Concrete. In: CEB-FIP (Hrsg.): *Proceedings of the 2nd fib-Congress, Neapel, 05.-08.06.2006*. Bd. 2, 2006, Book of Abstracts and CD-ROM, S. 428-430

